

## 支承に用いる六角ボルトを複数設置した場合の 耐力に関する検討

中尾 尚史<sup>1</sup>・余野 智哉<sup>2</sup>・大住 道生<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 専門研究員  
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>2</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員  
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員  
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震では、地震や津波、斜面崩壊等により多くの支承が損傷する被害を受けた<sup>1),2)</sup>。被害を受けた支承を見ると、ゴム支承本体やアンカーボルト、取付けボルト等様々な部品で損傷しており、作用状況により支承の破壊メカニズムが異なっている。これら支承を構成する様々な部品の損傷メカニズムを解明するために、各部品の耐力が評価されている<sup>例えば3),4)</sup>。また、これら地震による橋梁被害を教訓として、設計を超過する作用に対して、支承部に損傷を誘導して橋全体系が致命的な被害に至らないように損傷をデザインする方法および損傷を誘導する支承(損傷制御型支承)の検討が行われている<sup>例えば5),6)</sup>。

支承各部品の耐力は、主に水平方向および鉛直方向に対して、それぞれ評価している。しかし、支承には水平および鉛直方向の力が同時に作用するため、これらの力を同時に考えて評価する必要がある。

さらに、損傷制御型支承を設計するためには、損傷させる部品を設定し、かつ損傷させる部品と損傷させない部品の耐力を正確に評価したうえで、耐力差を設定することが重要である。

そこで著者らは、支承各部品における力の作用状況および耐力を把握することを目的とした。本稿では、下沓とベースプレートの間に取り付けられている六角ボルトを対象として、六角ボルトを実際の支承配置に取り付けた場合の六角ボルト全体としての耐力を載荷実験により検討した結果を報告する。

### 2. 実験概要

#### (1) 実験供試体および実験装置

##### a) 実験供試体

本研究では、支承に使用されている六角ボルト(S45C：機械構造用炭素鋼)を実験の対象とした。対象とした六角ボルトの材料諸元は表-1に示したとおりである。表中の引張荷重に示した実強度は、ミルシートにより得られたデータである。なお、径が36mm(M36)の六角ボルトの引張強度は計測されていなかったため、JISで記載されている引張強度から算出した値のみ示した。

本実験ではゴム支承本体の平面寸法が570mm×570mmの支承を想定し、六角ボルトは図-1に示すように、M24の六角ボルトの場合は8本、M36の六角ボルトの場合は4本取り付けした。

##### b) 実験装置

本研究では図-2および写真-1に示すような実験装置を用いた。実験では、ベースプレート(SM490材)と載荷治具(SS400材)を六角ボルトで接合し、1基又は2基の油圧ジャッキ(容量：200kN、最大ストローク：100mm)を用いて水平方向に載荷することで、接合させた六角ボルトを破断させた。なお、ベース

表-1 使用する六角ボルトの材料諸元

| 材質   | ボルト径    | 強度区分 | 引張荷重(kN) |     |
|------|---------|------|----------|-----|
|      |         |      | JIS※     | 実強度 |
| S45C | 24(M24) | 8.8  | 293      | 307 |
|      | 24(M24) | 10.9 | 367      | 406 |
|      | 36(M36) | 8.8  | 678      | -   |

※JISに記載されている引張強度に断面積をかけて算出

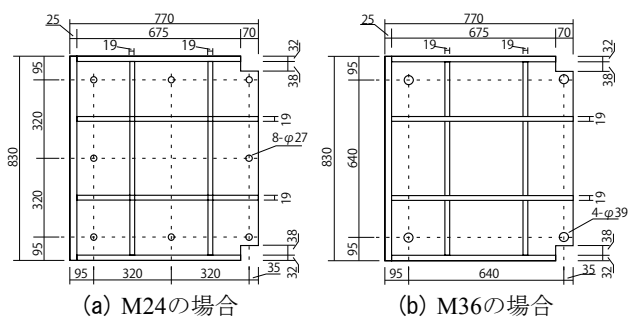


図-1 六角ボルトの取り付け位置

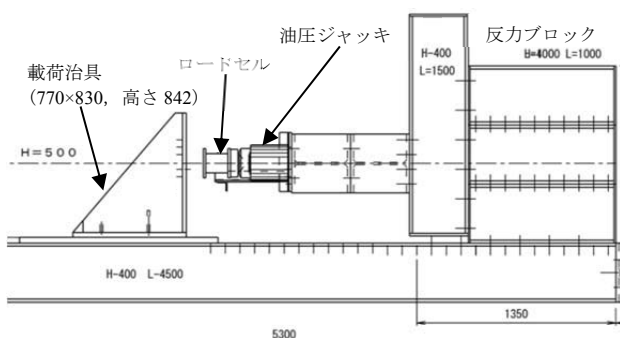


図-2 実験装置の概要(載荷高 500mm の場合)

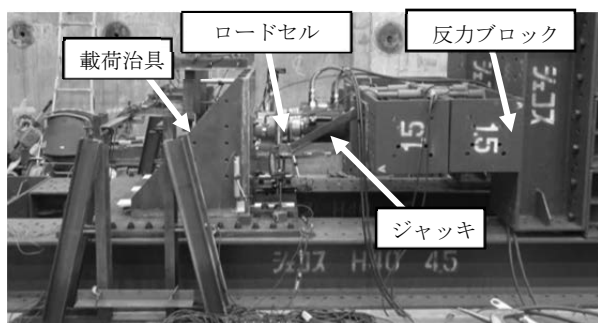


写真-1 実験装置のセットアップ状況(載荷高 500mm)

プレートと載荷治具の間には、できるだけ摩擦が生じないように、接触面は磨きをかけた。

六角ボルトはインパクトレンチにより、所定の値で締め付けた。ここで、六角ボルトを締め付ける大きさは、ベースプレートのネジ部が切れない大きさとし、M24は229.3Nm、M36は804.6Nmとした。

ジャッキにはロードセルを設置し、載荷荷重を計測した。また、載荷治具に変位計を設置し、載荷治具の水平及び鉛直変位を計測した。さらに、六角ボルトに生じたせん断力を把握するために、載荷治具の六角ボルト穴近傍にひずみゲージを貼り付け、六角ボルトを介して載荷治具に生じるひずみを計測した。各計測位置および各ボルトの名称は図-3に示した通りである。

## (2) 実験方法

本研究では、支承への作用状況の違いによる六角ボルト全体の耐力の変化を検討するために、載荷高および載荷方向を変化させて実験を行った。表-2及

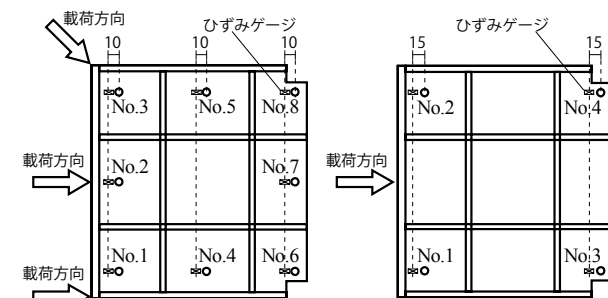
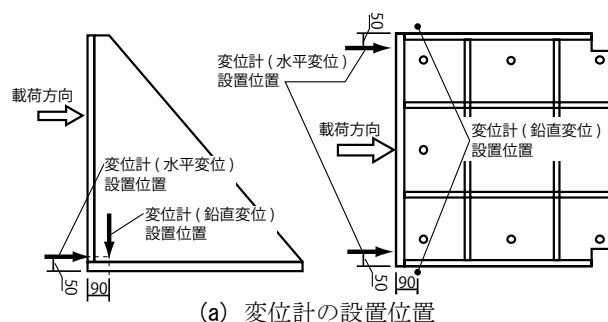


図-3 変位計及びひずみゲージの位置

表-2 実験ケース

|        | 対象とするボルト |      | 載荷高H<br>(mm) | 偏心量e<br>(mm) | 載荷方向<br>(°) |          |
|--------|----------|------|--------------|--------------|-------------|----------|
|        | ボルト径     | 強度区分 |              |              |             |          |
| Case1  | M24      | 8.8  | 0            | 0            | 0           | 基準<br>載荷 |
| Case2  | M24      | 8.8  | 300          | 0            | 0           |          |
| Case3  | M24      | 8.8  | 500          | 0            | 0           |          |
| Case4  | M24      | 8.8  | 750          | 0            | 0           |          |
| Case5  | M24      | 10.9 | 500          | 0            | 0           |          |
| Case6  | M36      | 8.8  | 500          | 0            | 0           |          |
| Case7  | M24      | 8.8  | 0            | 350          | 0           | 載偏<br>荷心 |
| Case8  | M24      | 8.8  | 500          | 350          | 0           |          |
| Case9  | M24      | 8.8  | 300          | 0            | 45          | 載斜<br>荷め |
| Case10 | M24      | 8.8  | 500          | 0            | 45          |          |

び図-4に本実験で検討したケースを示す。表中の載荷高は、ベースプレートからの高さであり、実際の支承の高さを想定して設定した。なお載荷高が0(H=0)はせん断力が卓越した場合に相当する。偏心量は、図-4に示すように、載荷治具の中心位置から偏心した距離であり、実験では載荷治具の端部とした。載荷方向は、図-3や図-4に示すように斜め載荷したときの角度であり、実験では45°とした。本稿では、偏心および斜め載荷していないケースを基準載荷、偏心して載荷したケースを偏心載荷、斜め方向に載荷したケースを斜め載荷と呼称する。基準載荷および斜め載荷では、ジャッキを2基使用するため、載荷治具の左右に取り付けた変位計により、実験供試体にねじりが生じないように監視しながら載荷した。

実験では、全ての六角ボルトが破断又はジャッキのストロークが限界に達するまで載荷を行った。得られた結果から、各ケースにおける六角ボルト全体の耐力を比較した。また、載荷治具より得られた水

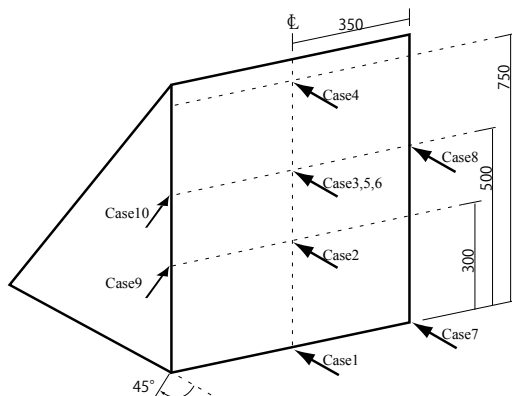


図-4 各ケースの載荷位置

平変位，鉛直変位，ひずみから，六角ボルトにどのような応力が生じたか計測した。但し，偏心載荷と斜め載荷は，ひずみゲージの向きと実際の主ひずみの方向が合っていなかったため，正しいひずみは計測できなかった。

### 3. 基準載荷による六角ボルトの耐力

#### (1) 載荷高が異なる場合 (Case1～4)

##### a) 荷重と変位の関係

図-5は水平変位と載荷荷重の関係を示したものである。横軸は載荷治具の水平変位，縦軸は載荷荷重である。載荷荷重は2基のロードセルの合計，水平変位は左右の変位計の平均を示した。なお，載荷高が750mm(Case4)については，ジャッキのストローク限界に達してもボルトが破断しなかったため，六角ボルトが全て破断する前に実験を終了した。

図より，載荷高が300mm(Case2)及び500mm(Case3)の場合，最大荷重は載荷高0(Case1)に対して4%及び14%程度低下している。逆に破断に至る水平変位は60%及び90%程度大きくなっている。載荷高が750mm(Case4)の場合，最大荷重はCase1に比べて40%程度低下している。なお，水平変位が0における100kN程度の急激な荷重の立ち上がりは，六角ボルトを締め付けたことによる下沓とベースプレート間に生じる摩擦の影響と考えられる。

本研究では参考として，道路橋示方書<sup>7)</sup>に記載されているせん断耐力の推定式を基に六角ボルト全体の耐力を次式により算出した。

$$F = \frac{\sigma_u}{\sqrt{3}} An = \frac{F_u}{\sqrt{3}} n \quad (1)$$

ここで， $F$ は六角ボルト全体の耐力， $F_u$ は表-1で示した六角ボルト単体の引張荷重， $\sigma_u$ は引張強さ， $A$

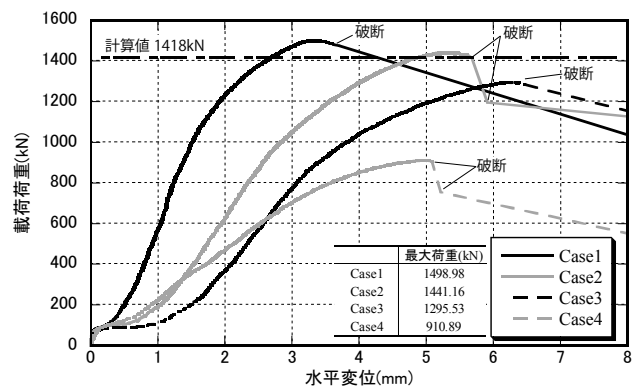


図-5 水平変位と載荷荷重の関係(Case1-Case4)

は断面積， $n$ は六角ボルトの本数である。本研究では，表-1で示したM24で強度区分8.8の六角ボルトにおける引張荷重を用いて六角ボルトの耐力の合計を求めた。その結果，全体の耐力は1418kNであった。

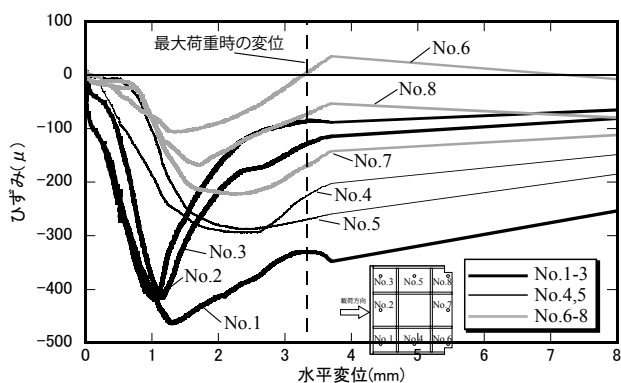
破断までの載荷荷重の最大値と比較した結果，実験値と計算値の誤差は，Case1では5%，Case2では2%程度である。一方，Case3では約10%，Case4になると約35%となり，計算値との誤差は大きくなる。そのため，載荷高が高くなるとせん断耐力のみで六角ボルト全体の耐力を評価することは困難になる。

##### b) 六角ボルトに生じる応力と破断状況

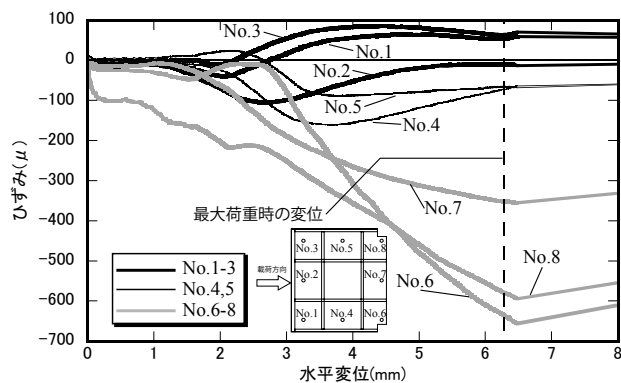
図-6は，六角ボルト穴近傍の載荷治具のひずみ量を示したものである。ここでは載荷高が0(Case1)と500mm(Case3)の結果を示した。横軸は載荷治具の水平変位，縦軸は六角ボルト穴近傍のひずみ量である。載荷治具に生じるひずみは，六角ボルトを介して載荷治具に圧縮ひずみ(負値)として生じるため，圧縮ひずみが大きいほど六角ボルトにせん断応力が生じていることを意味している。

載荷高が0(Case1)の場合，図-6(a)に示すように，載荷開始から1mm程度までは載荷側に近い六角ボルト穴付近(No.1～No.3)にひずみが生じている。しかし，1mmを超えた辺りから，ひずみが低下している。一方，載荷側から離れた位置(No.4～No.8)のひずみは，水平変位が1mmあたりから増加している。これより，最初は載荷側の六角ボルトに力が集中し，その後に他の六角ボルトにも力が作用すると考えられる。載荷高が500mm(Case3)の場合，図-6(b)に示すように載荷側のひずみ(No.1～3)は最大で-100μ程度しか生じていない。一方，載荷側から離れた位置(No.6～8)のひずみは，最大荷重時に-700μ近くまで達している。この計測結果から，載荷側の六角ボルトに作用したせん断力は非常に小さいと考えられる。

ここで，載荷治具のひずみからせん断力の合計を算出してみた。せん断力は得られた載荷治具に生じるひずみに鋼材のヤング率( $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ )をかけ，



(a) Case1 (荷高 0)



(b) Case3 (荷高 500mm)

図-6 各ボルト近傍の荷重治具に生じるひずみ

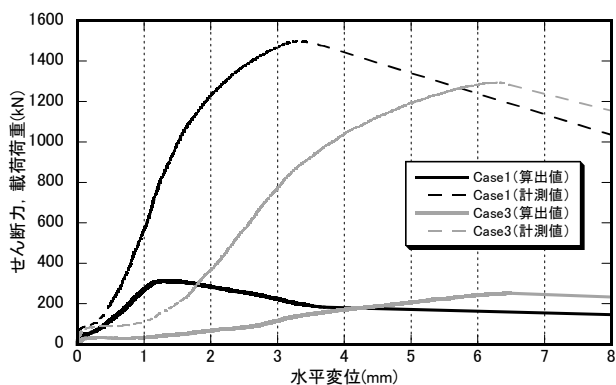
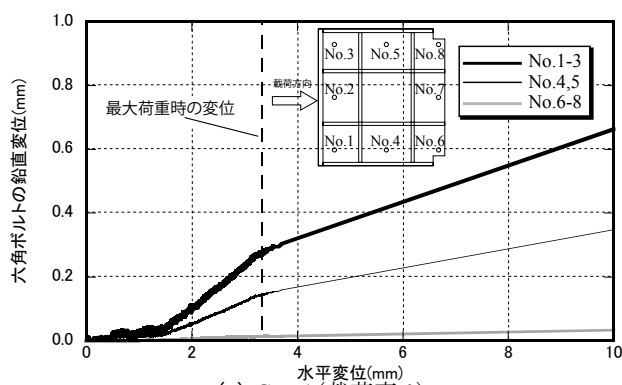


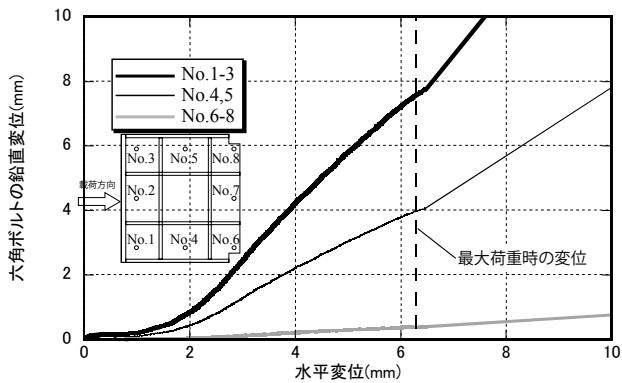
図-7 ひずみから算出した結果

この値を六角ボルトに作用させることで、六角ボルトのせん断応力度を算出した。なお、六角ボルトはベースプレート面を支点とした片持ちばりを仮定して(長さは板厚の32mm、幅はボルト径の24mm)、せん断応力度を計算した。

図-7はせん断力を算出した結果である。横軸は水平変位、縦軸はひずみから算出したせん断力の合計と荷重荷重である。図中には荷重荷重の結果も示した。算出した結果、両ケース共に合計したせん断力の最大値は、荷重荷重の最大値に比べて約20%になっている。また、式(1)から、六角ボルト1本当たりのせん断耐力を計算すると177kNに対し、ひずみから算出したせん断力は最大で100kN程度である。



(a) Case1 (荷高 0)



(b) Case3 (荷高 500mm)

図-8 六角ボルトのボルト鉛直変位

そのため、せん断力以外に引張力の影響もあると考えられる。ただし、図-5に示したように、式(1)で算出したせん断耐力の合計と荷重荷重の誤差が5%程度であったことから、全体の80%が引張力の影響とは考えられない。したがって、六角ボルトに生じるせん断応力の具体的な数値は判定できない。

本研究では、荷重治具の鉛直変位から六角ボルトの鉛直変位を求めた。算出した結果を図-8に示す。ここでは、荷重治具は剛体と仮定し、荷重治具先端から各六角ボルト位置までの距離の比率で六角ボルトの鉛直変位を求めた。荷重高が0(Case1)の場合、最大荷重時でも六角ボルトの鉛直変位は0.3mm程度である(図-8(a))。一方、荷重高が500mm(Case3)の場合、最大荷重時における荷重側の六角ボルトは7mm以上鉛直方向に変位している(図-8(b))。

写真-2は六角ボルトの破断状況である。基準荷重の場合、同じ列の六角ボルトの破断状況は同じだったため、ここではNo.1,4,6を示した。荷重高が0(Case1)の場合、全ての六角ボルトはベースプレート面で破断しており、その破断面は平らである(写真-2(a))。一方、荷重高が500mm(Case3)になると写真-2(b)に示すように、荷重側であるNo.1から3の六角ボルトの破断面はベースプレート面に対して斜めで、かつ若干伸び出した変形が見られる。No.4から8はベースプレート面で破断している。荷重高が

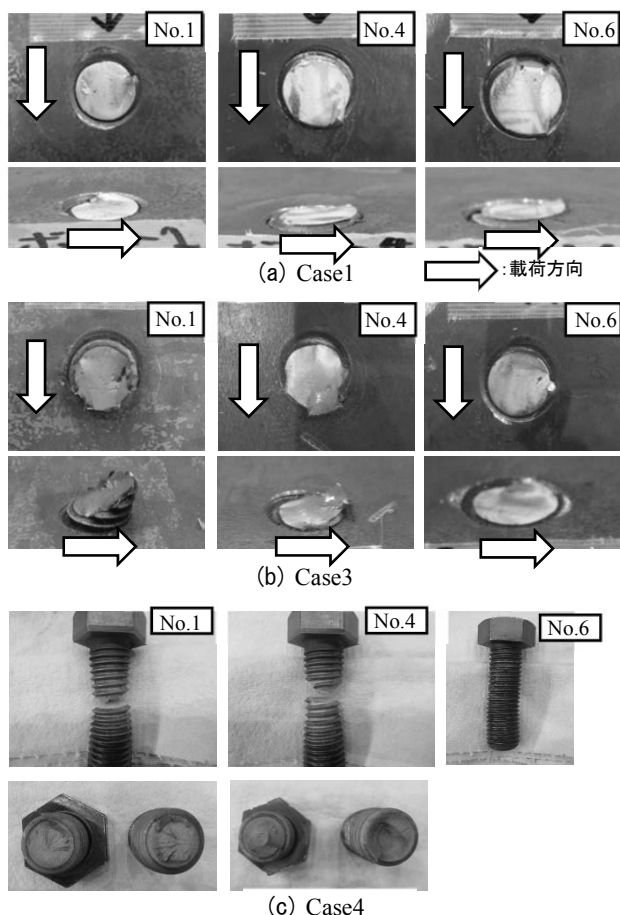


写真-2 実験終了後のボルトの破断状況

750mm(Case4)の場合、写真-2(c)に示すようにNo.1から5の六角ボルトは水平にかつ破断面付近の断面は小さくなっている。なお、破断しなかったNo.6から8の六角ボルトは、若干の曲げ変形が見られた。

このように、荷重高が高くなると六角ボルトに作用する力や破断状態は各位置で異なる。そのため、六角ボルト全体の耐力を評価するためには、前述した式(1)で示したせん断耐力のみで評価するのではなく、引張耐力も考慮する必要がある。

## (2) 材料強度及びボルト径が異なる場合 (Case5, 6)

図-9は六角ボルトの強度や径を変えた場合における荷重荷重と水平変位の関係である。参考として、Case3の結果も示した。図より、荷重荷重はどのケースもほぼ同じ挙動を示している。また、M36の六角ボルト(Case6)になると、破断した時の水平変位がCase3に比べて55%程度大きくなっている。なお、Case6については、水平変位0付近における荷重の立ち上がりが他のケースよりも100kN程度大きくなっている。六角ボルトを締め付けた大きさが、M24の六角ボルトに比べて大きいため、下査とベースプレート間の摩擦が大きくなったと考えられる。

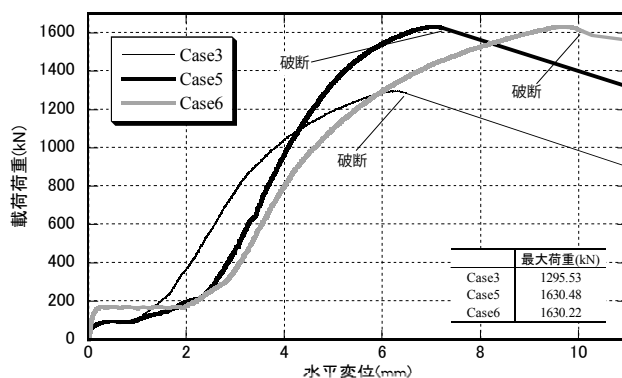


図-9 水平変位-載荷荷重の関係 (Case5,6)

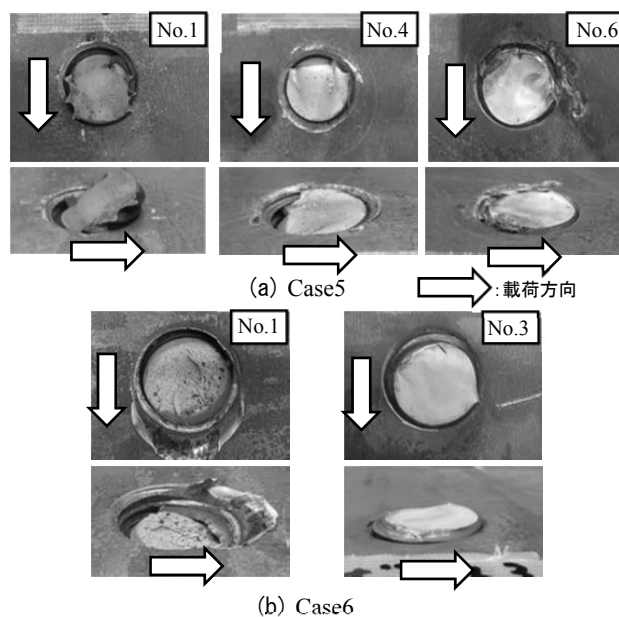


写真-3 実験終了後のボルトの破断状況

写真-3は六角ボルトの破断状況である。写真-3(a)に示した強度区分10.9の六角ボルト(Case5)の破断形状を見ると、写真-2(b)で示したCase3とほぼ同じ破断形状であった。ことから、六角ボルトの強度区分が変わっても、六角ボルトの破断挙動は変化しないと考えられる。M36の六角ボルト(Case6)の場合、写真-3(b)に示した六角ボルトの破断状況を見ると、ベースプレートのネジ部から破断していた。そのため、ボルト径が変わると、破断挙動に変化又はばらつきがみられると考えられる。

## 4. 偏心荷重、斜め荷重による六角ボルト耐力

### (1) 偏心荷重の場合 (Case7, 8)

#### a) 荷重と変位の関係

図-10は偏心荷重(Case7,8)した場合の荷重と変位の結果である。横軸は水平変位であり、荷重側(ジ

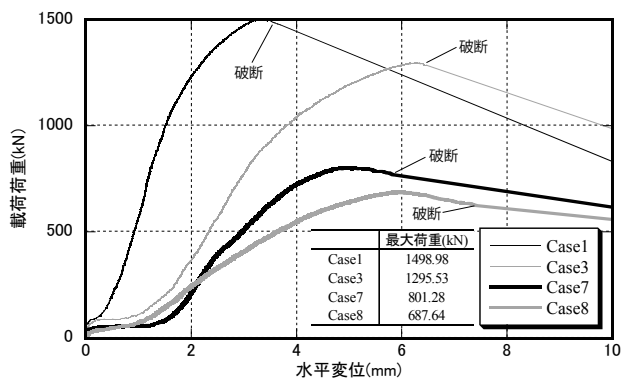


図-10 水平変位-載荷荷重関係 (Case7,Case8)

ジャッキ側設置側)で計測した水平変位を示した。縦軸は載荷荷重である。また比較のため、基準載荷 (Case1:載荷高0, Case3:載荷高500mm)の結果も示した。なお、Case7(載荷高0)におけるNo.5の六角ボルト、Case8(載荷高500mm)におけるNo.5とNo.8の六角ボルトは、ジャッキのストローク限界に達しても破断しなかった。

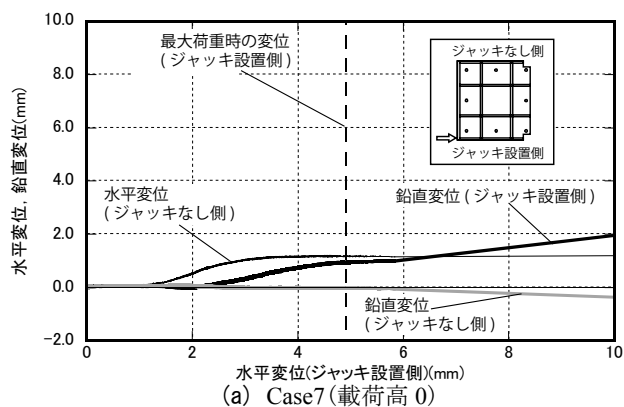
載荷高が0(Case7)の場合、基準載荷(Case1)に比べて最大荷重は約1/2に低下している。載荷高が500mm(Case8)の場合も同様に基準載荷(Case3)に比べて最大荷重は約1/2に低下している。基準載荷と異なり、同じ列の六角ボルトでも同じ大きさの力が作用していなかったと推定される。

#### b) 載荷治具の挙動メカニズム

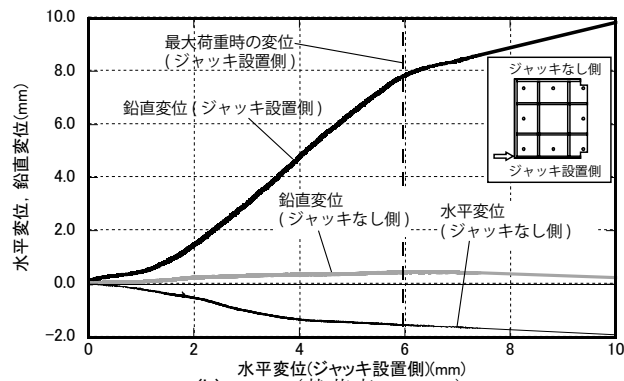
図-11は載荷治具の水平及び鉛直変位の関係を示したものである。横軸はジャッキ設置側の水平変位、縦軸はジャッキなし側の水平変位と鉛直変位である。

載荷高が0(case7)の場合、最大荷重の水平変位は、ジャッキ設置側では5mm程度に対し、ジャッキなし側では1mm程度であったため、載荷治具は反時計まわりに回転していたと考えられる。最大荷重時の鉛直変位は、両側共に1mm以下であり載荷治具は浮き上がっていない。No.5の六角ボルトが破断しなかったことも考慮して、載荷治具はほぼ浮き上がらずにNo.5の六角ボルトを軸として反時計回りに回転する挙動を示していたと考えられる。

載荷高が500mm(Case8)の場合、最大荷重時における水平変位は、ジャッキなし側で負値になっているため、載荷治具は反時計回りに回転していたと考えられる。鉛直変位は、ジャッキ設置側では8mm程度に対して、ジャッキなし側では1mm以下である。No.5およびNo.8の六角ボルトが破断しなかったことも考慮して、載荷治具はジャッキ設置側が持ち上がり、かつ、No.5およびNo.8付近を軸として反時計回りに回転する挙動を示していたと考えられる。



(a) Case7(載荷高 0)



(b) Case8(載荷高 500mm)

図-11 水平変位と鉛直変位の関係

#### c) 六角ボルトの破断状況

載荷高0(Case7)の場合、写真-4に示した六角ボルトの破断状況を見ると、六角ボルトはベースプレート面で破断しており、かつ破断面は平らである。したがって、せん断破断したといえる。また、破断しなかったNo.5の六角ボルトを見ると、ほぼ変形していない。このことから、このボルト回りに回転していたといえる。載荷高が300mm(Case8)の場合、写真-5に示すように、No.1,2,4の六角ボルトはベースプレート面に対して斜め方向かつ若干伸びて破断している。一方、No.3,6,7の六角ボルトは、ベースプレート面で平らに破断している。また、破断しなかったNo.8の六角ボルトには変形が見られなかった。

#### (2) 斜め載荷の場合 (Case9, 10)

図-12は斜め載荷(Case9,10)した場合の荷重と変位の関係の結果である。横軸は水平変位、縦軸は載荷荷重である。また図中には比較のため基準載荷 (Case2:載荷高300mm, Case3: 載荷高500mm)の結果も示した。なお、Case10の場合、No.1,4,6-8の六角ボルトはジャッキのストロークの限界に達しても破断しなかった。

載荷高が300mm(Case9)における最大荷重は、基準載荷(Case2)に比べて約8%低下している。載荷高が500mm(Case10)では、最大荷重は基準載荷(Case3)に

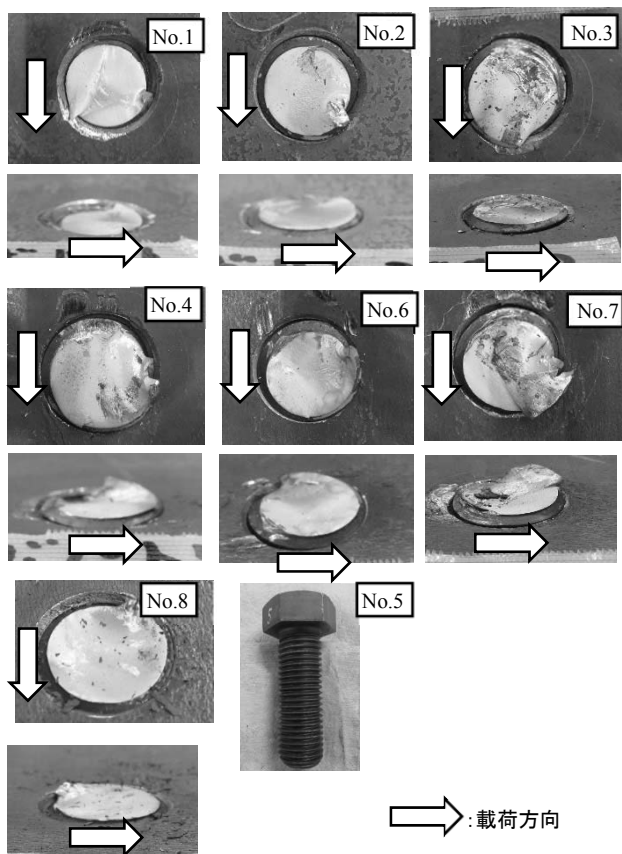


写真-4 実験終了後のボルトの破断状況(Case7)

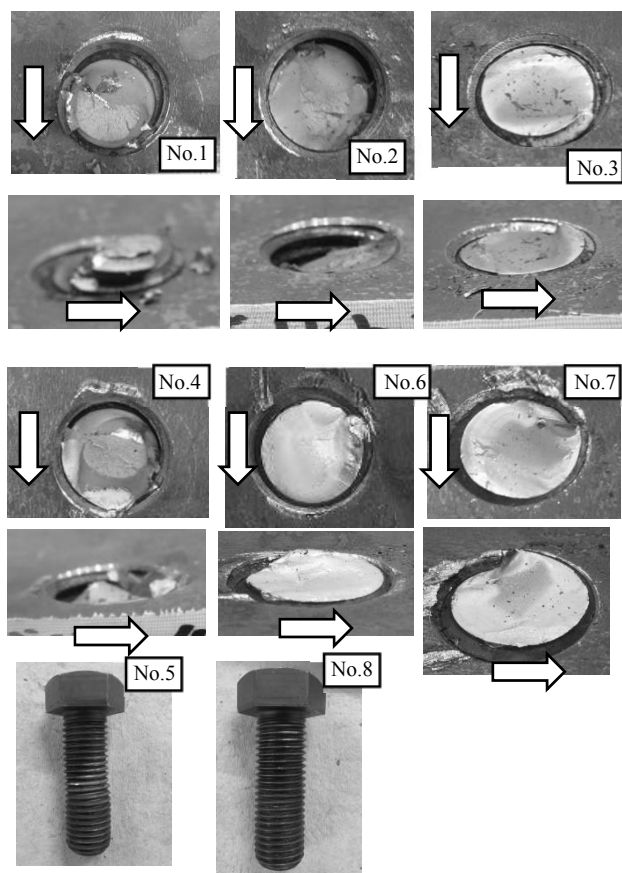


写真-5 実験終了後のボルトの破断状況(Case5)

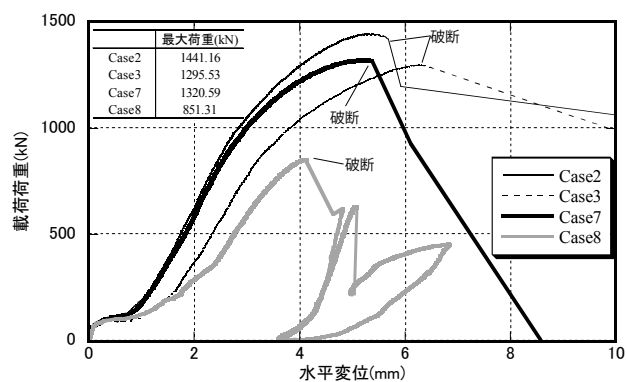


図-12 水平変位-荷重荷重関係 (Case9,Case10)

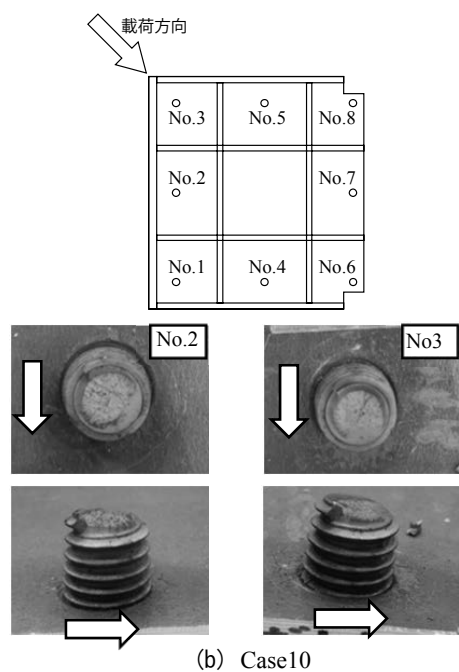
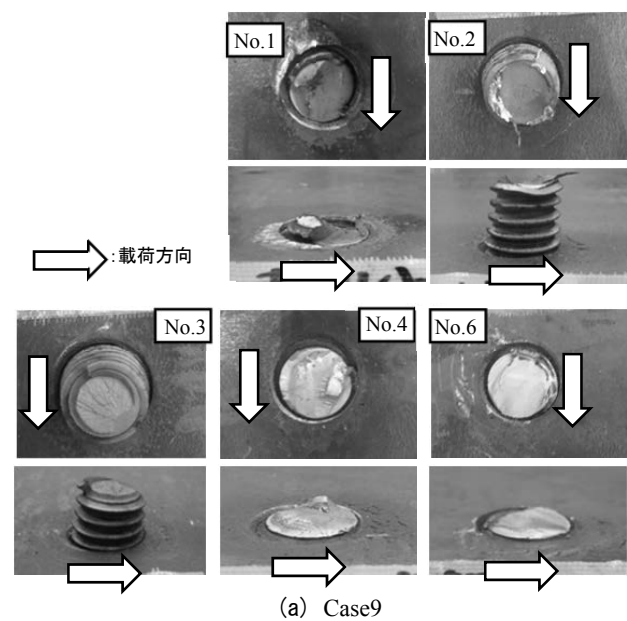


写真-6 実験終了後のボルトの破断状況

比べて約34%低下している。

写真-6は、実験終了後の六角ボルトの破断状況を示したものである。載荷側に近い六角ボルトは、ベースプレート面で破断せず、少し上方の位置で破断している。また、破断したボルトの破断面を確認したところ、破断面付近の断面が小さくなっていた。また、写真-6に示すように、斜め載荷の場合も載荷治具の載荷側が持ち上がるような挙動を示したために、載荷側の六角ボルトには引張力の影響が大きくなったと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、支承各部品における力の作用状況や耐力を把握することを目的として、下沓とベースプレートの間に取り付けている六角ボルト全体の耐力を載荷実験により検討した。本実験の範囲ではあるが、得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 基準載荷(支承設置の方向に対して平行に載荷)の結果、載荷高が0(せん断力が卓越)の場合、載荷治具は水平に移動する挙動を示す。そのため、六角ボルト全体には、主としてせん断力が作用する。また、最大荷重は道路橋示方書に記載されているせん断耐力の和とほぼ等しかった。
- 2) 載荷高が高くなると、載荷治具の載荷側が浮き上がりながら水平移動する挙動を示す。この挙動により、六角ボルトにはせん断力以外に引張力も作用するため、載荷高0に比べて破断至る荷重が小さくなる。したがって、支承としての破断を評価するためには、せん断力のみで評価するのではなく、引張力も考慮する必要がある。
- 3) 偏心載荷および斜め載荷した結果、載荷治具は平行載荷と異なる挙動を示すため、各六角ボルトに作用する力が異なり、全体の破壊挙動も異なる。
- 4) ボルトの破断面を見ると、載荷高が0の場合は主にせん断力が作用するため、六角ボルトはベ

ースプレート面でかつ水平に破断した。一方、載荷高が高くなると、破断面はベースプレート面に対して斜め方向に破断した。また、斜め載荷で載荷高が500mmの場合、載荷側に近い六角ボルトはベースプレートの上方で水平に破断していた。これらは、引張力の影響が大きくなった可能性が考えられる。

今後は、これらのデータを詳細に分析し、載荷状況と六角ボルトに作用する力の関係を把握しつつ、六角ボルト全体の耐力を評価する手法を検討および提案する予定である。

## 参考文献

- 1) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第814号/土木研究所資料第4295号，2014.
- 2) 平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第.967号/土木研究所資料第4359号，2017.
- 3) 中尾尚史，炭村透，森屋圭弘，星隈順一：津波の影響を受ける既設橋における支承部の評価技術に関する研究，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.73，No. 2，pp. 413-432，2017.
- 4) 鈴木慎也，西田秀明，星隈順一：熊本地震による積層ゴム支承の破壊形態の分析，第21回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.381-388，2018.
- 5) 大住道生，中尾尚史，西弘明：橋の損傷シナリオデザインによる超過作用への対応策の一提案，日本地震工学会論文集，2019。（掲載決定）
- 6) 森屋圭浩，中尾尚史，星隈順一：津波の影響を受ける橋に対する損傷制御型支承の提案，第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.511-518，2016.
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説II鋼橋・鋼部材編，2017.